



Studijní program B 2341 – Strojírenství

Materiály a technologie

Zaměření strojírenská metalurgie

Návrh a optimalizace obvodové části kola historického soutěžního vozu

Design and optimization of a wheel's outer barrel
of a historic race car

David Márinka

KSP – SM – B53

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Machuta, Ph.D.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 58

Počet tabulek: 4

Počet obrázků: 48

Počet příloh: 5

Liberec, 3.1.2014



Stránka pro originální zadání

Katedra strojírenské technologie

Studijní rok: 2013/14

Oddělení strojírenské metalurgie

ANOTACE

Studijní program: B2341 - Strojírenství

Student: David Márinka

Téma práce: **Návrh a optimalizace obvodové části kola historického soutěžního vozu**

Design and optimization of a wheel's outer barrel of a historic race car

Číslo BP: KSP – SM – B53

Vedoucí BP: Ing. Jiří Machuta, Ph.D.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá teorií gravitačního odlévání do pískové formy aplikované na konkrétním případě obvodové části disku (dále jen límce) soutěžního vozu. V této práci je rozebrán kompletní postup při řešení malosériové výroby odlitku. Bakalářská práce zahrnuje teoretické zkoumání problematiky, její optimalizaci a plynule přechází do praktického řešení odlití límce. Při řešení této problematiky je využito moderních simulačních metod umožněných softwarem Magma 5.2 a stejný důraz je kladen na experimentální část, která se věnuje klasickým metodám v oboru slévárenství.

Klíčová slova

Gravitační lití, hliníková slitina, písková forma, simulace, límec kola.

Abstract

Presented bachelor's thesis deals with the theory of gravity casting into the sand mould, particularly applied on an example of a wheel's outer barrel (hereinafter rim) of a historic race car. Complete analysis of outlined procedure is given, focusing on issues of small-scale serial production. Before covering the practical solution of rim casting, the theoretical background of problematics is given, including the optimization possibilities. Along with rather classical methods of the foundry that are directly related to the practical part of the thesis, the modern methods of computer simulation, enabled with Magma software, are revealed .

Key words

Gravity casting, aluminum alloy, sand mold, simulation, wheel rim.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci 3. 1. 2014

.....

David Márinka

Skelná 59

46602 Jablonec nad Nisou

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Machutovi, Ph.D. za věnovaný čas, mnoho rad a udávání směru, kterým by se měla práce ubírat. Dále pánům Martinovi Žďárskému a Liboru Nezkusilovi ze společnosti Unitherm s. r. o. za cenné rady a pomoc při praktickém řešení. V neposlední řadě patří můj dík panu Vladimíru Mužákovi za zapůjčení historických podkladů pro tuto práci.

Obsah

Seznam symbolů, jednotek a zkratk	10
Úvod.....	12
1 Teoretická část.....	14
1.1 Slévárenská forma.....	14
1.2 Pískové slévárenské formy.....	15
1.2.1 Ostřivo ve slévárenské formovací směsi	16
1.2.2 Pojivo ve slévárenské formovací směsi.....	18
1.3 Modelové zařízení.....	20
1.4 Hliníkové slitiny pro slévárství	21
2 Experimentální část	23
2.1 Materiálová analýza	23
2.2 Konstrukce formy.....	26
2.2.1 Model.....	26
2.2.2 Nálitky	27
2.2.3 Vtoková soustava:	28
2.3 Simulace lícího procesu	32
2.3.1 Příprava podkladů.....	32
2.3.2 Simulace odlití.....	34
2.3.3 Vyhodnocení simulace	35
2.3.4 Alternativní varianta odlitku	40
2.3.5 Simulace odlití alternativní varianty odlitku	43
2.3.6 Vyhodnocení simulací.....	46
2.3.7 Výroba modelu	46
2.3.8 Odlití límce.....	46
3 Závěr.....	51

4	Zdroje	53
	Použitá literatura	53
	Seznam obrázků	54
	Seznam tabulek	56
	Elektronická příloha.....	57

Seznam symbolů, jednotek a zkratek

AZNP	Automobilový závod národní podnik	
ČSN	Česká technická norma	
CNC	Computer Numerical Control – Číslicové řízení pomocí počítače	
R _m	mez pevnosti	[Mpa]
B	smrštění taveniny při změně teplot, od lití po teplotu tuhnutí	[-]
V _o	objem odlitku	[mm ³]
V _N	objemu nálitku	[mm ³]
x	součinitel nehospodárnosti odlitku	[-]
S _k	průřez svislého liciho kanálu	[mm ²]
S _s	průřez vodorovného liciho kanálu	[mm ²]
S _z	průřez zářezu	[mm ²]
t _{lití}	doba lití	[s]
a	součinitel závisející na tloušťce stěny odlitku a na druhu materiálu	[-]
m	hmotnost odlitku včetně nálitků	[kg]
H _ú	účinná výška vtokové soustavy	[mm]
H	celková výška vtokové soustavy	[mm]
C	celková výška odlitku	[mm]
ρ _o	hustoty použité hliníkové slitiny	[kg/m ³]
m _o	hmotnost odlitku	[kg]
m _N	hmotnost nálitků	[kg]
S _{min}	minimální průřez zářezů	[mm ²]
μ	součinitel hydraulických ztrát vtokové soustavy	[-]
g	gravitační konstanta	[s ⁻¹]
.stl	StereoLithography file format – formát souboru StereoLithography	
.sat	Standard ACIS Text file format – formát souboru Standard ACIS Text	

AZ91 – Hořčíková slitina

AlSi10Mg – Slitina hliníku a křemíku

Al – Aluminium – Hliník

Si – Silicium – Křemík

Mg – Magnesium – Hořčík

Cu – Cuprum – Měď

Zn – Zincum – Zinek

Mn – Manganum – Mangan

Fe – Ferum – Železo

Sn – Stannum – Cín

Ca – Calcium – Vápník

Ce – Cerium – Cer

Ni – Niccolum – Nikl

Ag – Argentum – Stříbro

La – Lanthanum – Lanthan

Cd – Cadmium – Kadmium

Be – Beryllium – Beryllium

Sr – Stroncium – Stroncium

Úvod

Závodní vozy jsou tím nejatraktivnějším z celého automobilového průmyslu. Jejich atraktivita se neodvívá pouze od rychlostí, jakou se po soutěžních tratích pohybují. Je dána neotřelým vzhledem a technickými řešeními, která se od sériové produkce mnohdy velmi liší. Ne jinak tomu bylo v sedmdesátých letech minulého století, kdy na rallyových tratích závodila slavná Škoda 130RS, která získala mnoho úspěchů doma i v zahraničí. [1] Proslavila automobilku Škoda po celé Evropě i díky zahraničním jezdcům jako byl John Haugland, viz Obr. 1.

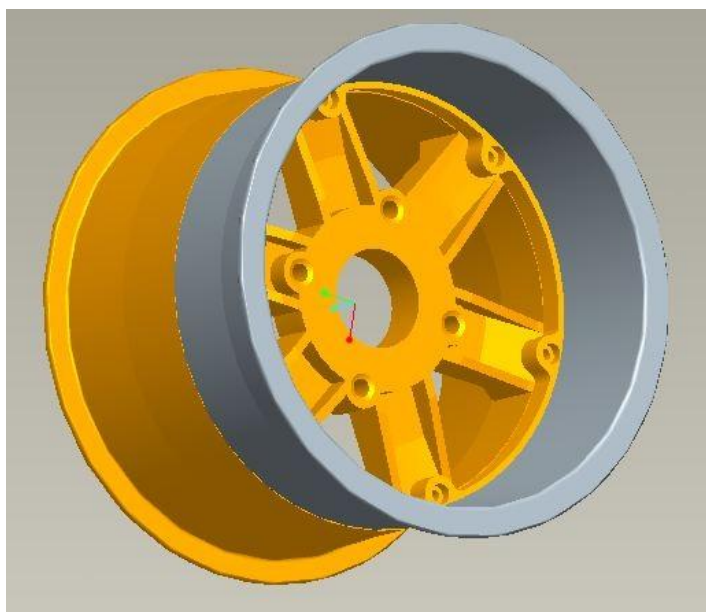


Obr. 1 John Haugland se Škodou 130RS na Rally Akropolis

Při stavbě repliky soutěžního vozu Škoda 110R pro soutěžní skupinu A2 jsem nucen řešit mnoho problémů s nedostupností dobových speciálních dílů, které se používaly výhradně pro motorsport. V mnoha případech lze tento problém řešit zakoupením méně či více kvalitních replik.

V dnešní produkci lze nalézt několik výrobců zabývajících se odléváním součástí jako jsou díly motoru, brzd či kol. Ale výrobců, kteří by zaručili kompatibilitu originální součásti s jejich výrobky tak, aby vznikl funkční celek, není mnoho.

Proto se v této práci věnuji tvorbě technologické dokumentace, vycházející z originálních dokumentů AZNP Mladá Boleslav, která zajišťuje správné rozměrové parametry límce kola, a tvorbě technologických podkladů tak, aby bylo možné tento díl používat v sestavě s originálním středem vyrobeným v sedmdesátých letech minulého století, viz Obr. 2.



Obr. 2 3D model dvoudílného disku

Tato úloha vyžaduje znalosti v oboru slévárenství, které umožňují tvorbu modelového zařízení, volbu odpovídajícího materiálu, či práci na samotném formování a odlití límce.

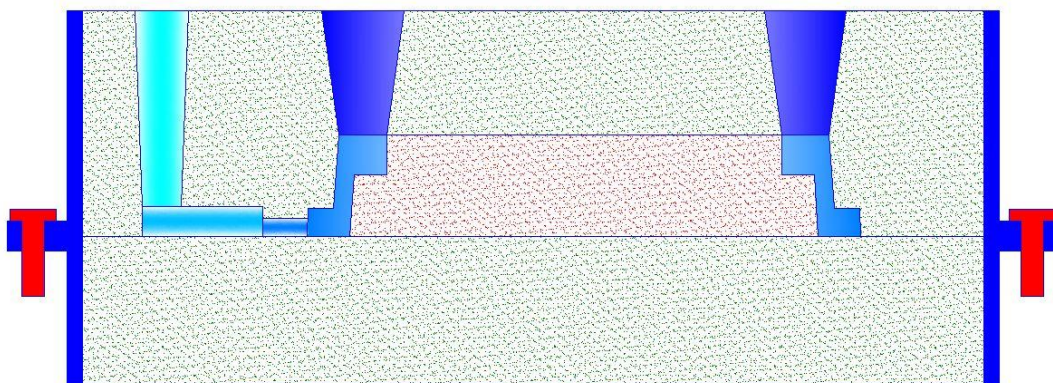
1 Teoretická část

1.1 Slévárenská forma

[2], [3], [4]

Pro výrobu malé série odlitků jednoduchého tvaru z hliníkových slitin je ideální technologií gravitační odlévání do pískové formy. U odlitku, který má většinu ploch obráběných, lze úspěšně využít ručního formování, a tak je výroba relativně snadno proveditelná a ekonomicky nenáročná.

Slévárenská forma je dutina tvaru budoucího výrobku, na kterou se váže několik dalších částí, které zajišťují dopravu taveniny do formy, čištění taveniny, nebo doplňování tekutého kovu do chladnoucího odlitku, viz Obr. 3. Při správném návrhu lze dosáhnout kvalitních odlitků bez staženin, pórovitosti či jiných vad.



Obr. 3 Základní části slévárenské formy

Forma je negativem hotového slévárenského výrobku, který je proti konečnému obrobku zvětšen o hodnotu tepelného smrštění odlévaného kovu, dále je zesílen o přídavky na obrábění a opatřen technologickými úkosy, které požaduje daná technologie formování.

Základní částí je vtoková soustava, jejíž funkcí je doprava taveniny do dutiny slévárenské formy. Obvyklou konstrukcí vtokové soustavy je svislý vtokový kanál, kam je přiváděna tavenina. Při výrobě hliníkových odlitků se tavenina vlévá z kelímku přímo do lící nálevky.

Na svislý vtokový kanál navazuje kanál vodorovný, jehož hlavní funkcí je rozvádět taveninu k zářezům. Dále se k vodorovnému kanálu váží funkce jako je čištění

taveniny, či ustálení proudu tekutého kovu. Zářezy se na vodorovný licí kanál umísťují ke spodní hraně tak, aby se nečistoty vyplouvající k hladině, nedostaly do dutiny formy, ale zůstaly ve vodorovném licím kanálu.

Pomocí zářezů ústí tavenina do dutiny formy. Zářezy musí zajišťovat co nejplynulejší přívod taveniny do formy a po ztuhnutí odlitku musí být jednoduše oddělitelné. Zaústění do dutiny formy se provádí ve spodní či horní části nebo v jejím středu. Lití spodem se vyznačuje klidným plněním dutiny formy bez rozstříku taveniny. Nevýhodou této metody je skutečnost, že se do nálitků dostává výrazně chladnější tavenina, to může vést ke vzniku staženin už v odlitku. U lití horem toto nebezpečí nevzniká, protože nejteplejší tavenina je vždy na hladině, nevýhodou je dopad taveniny z výšky na dno, kde se může forma vymílat. Lití středem kombinuje oba způsoby v tom smyslu, že před dosažením úrovně zářezů odpovídá metoda vrchnímu lití a následně jsou vlastnosti stejné jako u lití spodem.

Průřezy jednotlivých částí se různí podle toho, zda je požadováno plnění přetlakové, kde tavenina díky zmenšujícímu se průřezu od svislého licího kanálu k zářezům stříká ze zářezů do dutiny formy, nebo naopak, je-li požadavek, aby tavenina pozvolna stékala po stěně formy u plnění podtlakového, kde je poměr průřezů obrácený.

Další částí, která se již neváže k vtokové soustavě, ale zásadně ovlivňuje výsledný odlitek, jsou nálitky zajišťující dostatečné množství tekutého materiálu, který se při chladnutí dosazuje za stažený materiál v dutině formy. Nálitky se konstruují tak, aby v nich tavenina tuhla nejpozději a nevznikaly tak nežádoucí staženiny v odlitku.

Vtoková soustava i nálitky jsou připojeny k dutině slévárenské formy.

1.2 Pískové slévárenské formy

[2]

Písková slévárenská forma je netrvalého charakteru, takže je pro každé odlití nutné vyrobít formu novou. Při jednom odlití je možné zhotovit více odlitků. Z důvodu malé tepelné vodivosti je doba chladnutí velká. Tento druh formy se používá především pro odlévání litin, případně slitin hliníku a mědi. Významná je pro malosériovou výrobu, kdy není možné z ekonomického hlediska vyrábět formu trvalou.

Z hlediska použití lze formovací směsi dělit na směsi pro strojní formování, pro ruční formování a jádrové směsi. Směsi pro strojní formování jsou homogenní

a vyplňují jak prostor formovacího rámu, tak obklopují líc modelu. Kvalitě formovací směsi odpovídá povrch odlitku.

Dále formovací směsi pro ruční formování jsou obvykle složeny z kvalitnější modelové směsi, kterou je zasypán model, a při odlévání určuje jakost povrchu odlitku, a výplňovou, která je méně kvalitní a vyplňuje zbývající prostor slévárenského rámu. Tato směs se získává z recyklované formovací směsi.

Nejvyšší nároky jsou kladeny na směs jádrovou, která je tepelně velmi namáhána, protože většina jejího povrchu je obklopena roztaveným kovem. Směs musí mít dobrou rozpadavost, aby šla jednoduše odstranit z dutin odlitku.

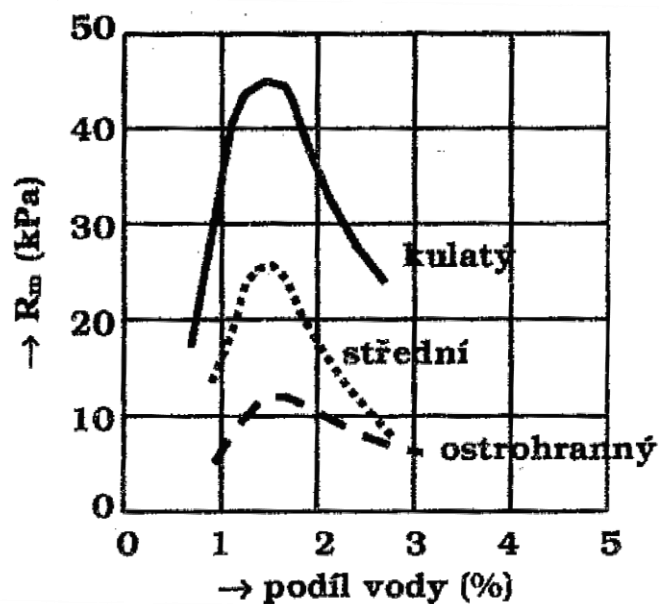
Základními složkami formovací směsi je ostřivo a pojivo. Obvykle směs obsahuje ještě další prvky jako je voda, či přísady, které zlepšují její vlastnosti při styku s roztaveným kovem. U pískové slévárenské formy tak lze zvyšovat např. rozpadavost, odolnost proti zapečeninám nebo prodyšnost.

1.2.1 Ostřivo ve slévárenské formovací směsi

[5], [6]

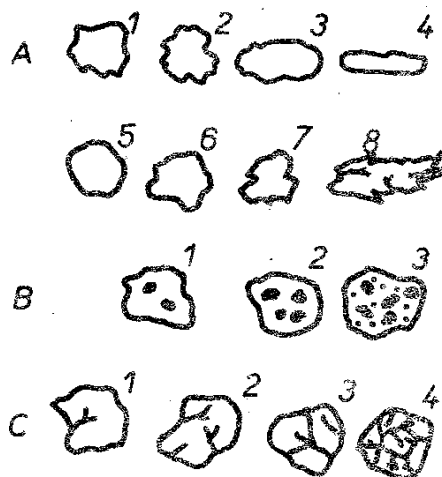
Ostřivo je základním stavebním materiálem celé pískové formovací směsi. Tvoří ji až z 98 %. Zrna ostřiva jsou velikosti minimálně 0,02 mm a tvoří skelet pískové formy. Základní parametrem ostřiva je velikost a povrch zrn, jeho zrnitost a chemická podstata. Pro každý odlitek je nutné zvolit správné ostřivo dle několika specifických parametrů. Druh ostřiva se určuje na základě chemické povahy odlévaného kovu, lící teploty a tvarové složitosti. Podle těchto vlastností odlitku volíme ostřivo z kategorie kyselých, zásaditých či neutrálních.

Tvar zrn ostřiva je dán jejich vznikem. Zatímco zrna písku přenášená vzduchem jsou zakulacená, vodní a ledovcové písky jsou většinou ostrohranné. Jejich tvar má významný vliv na vlastnosti formovací směsi. Kulatá zrna jsou lépe zpěchovatelná, ale také je lze snáze přepěchovat a můžou tak být příčinou vzniku vad vlivem tepelná dilatace. Vliv tvaru ostřiva na mechanické vlastnosti formovací směsi lze pozorovat na Obr. 4. Pro výrobu syntetických bentonitových směsí je tedy výhodné používat písky poloostrohranné se sníženou zpěchovatelností.



Obr. 4 Vliv ostřiva na mechanické vlastnosti

Zrna se dělí podle tvaru na izometrická, protažená krátce či dlouze. Dále se dělí dle hran, povrchu a celistvosti dle Obr. 5. Význam jednotlivých nákrešů je následující: A - Hrany zrna: 1-2: kulatá zrna, 3-5: hranatá zrna se zakulacenými hranami, 6-7: ostrohranná, 8: tříštěná zrna; B - Povrch zrna: 1: hladký, 2: polodrsný, 3: drsný; C - Celistvost zrna: 1-2: rozpukání slabé, 3-4: Rozpukání silné.



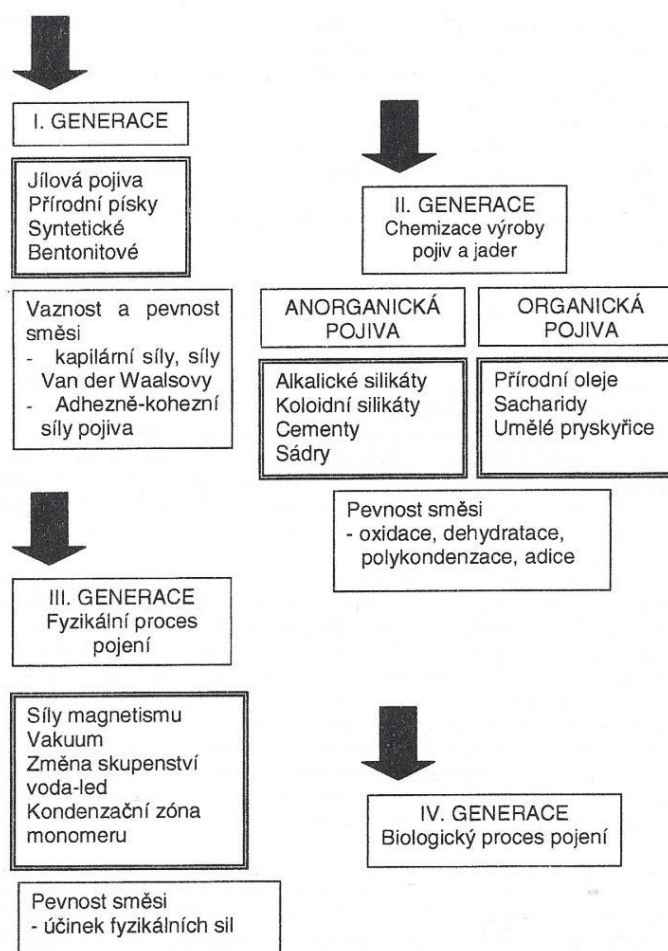
Obr. 5 Rozdělení pískových zrn

Povrch zrn má zásadní vliv na pevnostní vlastnosti formovacích směsí. Hodnota povrchovosti je nepřímo úměrná průměru částic. Se zmenšováním průměrné zrnitosti se povrch zrn rapidně zvyšuje.

1.2.2 Pojivo ve slévárenské formovací směsi

[7], [8], [9]

Správná volba pojiva zajišťuje vznik kvalitní formovací směsi. Při spojení ostřiva s pojivem se pak posuzují vlastnosti celé směsi, jako je vaznost za syrova, pevnost po vysušení a vytvrzení, pevnost za vysokých teplot a rozpadavost směsi. Vývoj pojiv formovacích směsí lze rozdělit do čtyř generací dle Obr. 6.



Obr. 6 Rozdělení generací pojiv

Pro výrobu formy s využitím pojiva I. generace je nutný mechanický způsob pojení, kdy je celá směs ručně či strojně pěchována. II. generace umožňuje pojení chemickou cestou. V případě III. generace se nevyužívá ostřiva, ale fyzikálních sil, které tvoří pevnost formy. Poslední IV. generace pojí ostřivo na základě biologického účinku.

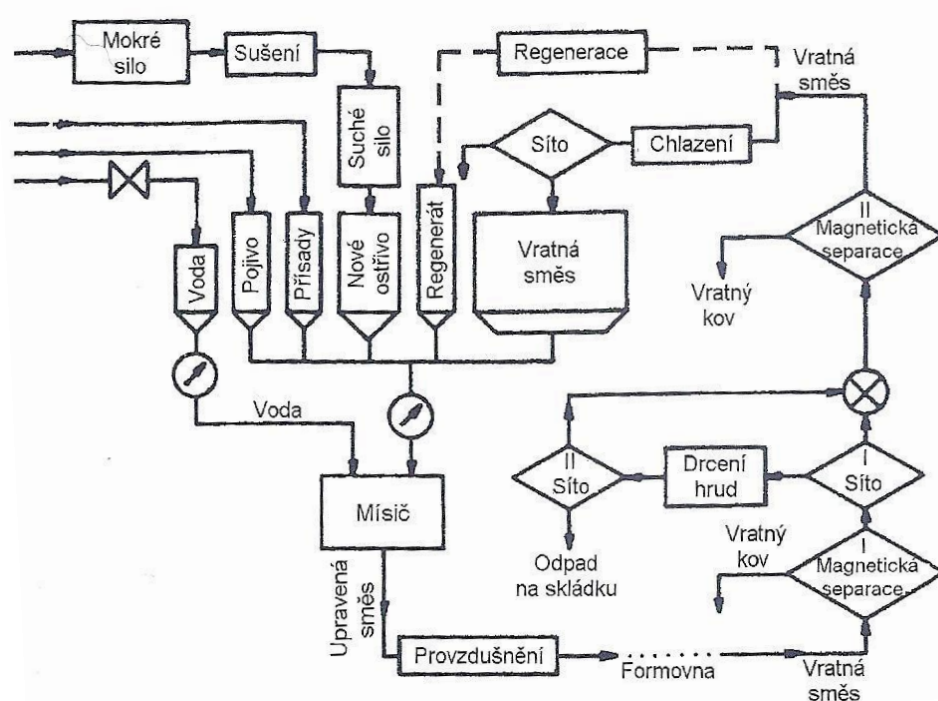
Odlitky z hliníkových slitin v pískové formě se ve většině případů formují do takzvaných bentonitových směsí. Bentonitová směs obsahuje jílové pojivo řadící se do

I. generace pojiv. Má výbornou pojivovou schopnost, díky níž lze připravit směs s nejmenším obsahem vody.

Jádra jsou obvykle vyráběna z koloidního roztoku silikátů tzv. vodního skla. Po zaformování se jádro vytvrdí profouknutím oxidem uhličitým. Při správném vytvrzení je jádro velice pevné a odolává vysokým teplotám.

Bentonit je velice významným pojivem vhodným pro odlévání hliníkových slitin. Jedná se o jílovitou horninu, která je mineralogicky budována především z montmorillonitu. Vyznačuje se vysokou sorpční schopností, bobtnáním a plastičností. Bentonity průmyslově používané pro slévárnictví obsahují 65-85% montmorillonitu.

V současné době bentonitové směsi na syrovo pokrývají více než 70% produkce malých a středních odlitků. Spotřeba bentonitu je asi desetinásobná vůči hmotnosti odlévaného materiálu, proto je nutné, aby byla směs recyklována, jak je tomu naznačeno na Obr. 7.



Obr. 7 Schéma regenerace ostřiva

Oběh bentonitové směsi je zajištěn na základě oživování novým ostřivem a pojivem. Proces řízení jakosti formovací směsi obnáší zjištění přesného stavu aktuálního vratu dle odlitků (bentonitová forma, jádra z CT směsi) a na základě zjištěné situace se dodává různé množství a druh materiálu pro regeneraci směsi.

1.3 Modelové zařízení

[10]

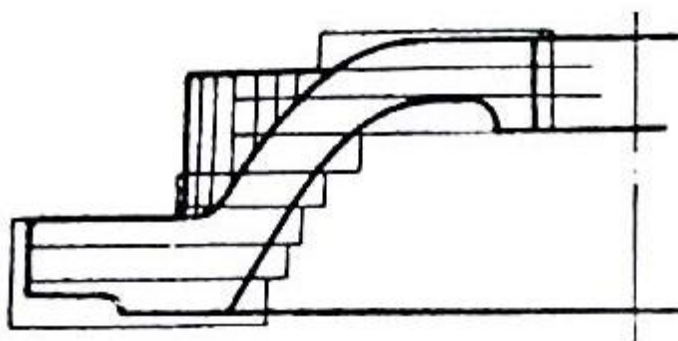
Modelové zařízení vytváří dutinu formy a další funkční plochy. Na rozdíl od hotového výrobku modelové zařízení nabývá větších rozměrů, což je dáno přídavky na obrábění a technologickými úkoly. Tvar modelového zařízení je tedy stejný, jako je tvar odlitku. Přídavky na obrábění jsou dány normou ČSN EN ISO 8062 v závislosti na rozměrech a přesnosti. Pro snadné vyjímání modelu z formy je model opatřen technologickými úkoly, které zajišťují vyjmutí modelu bez jeho poškození, stejně tak bez poškození formy.

Model lze vyrobit mnoha technologiemi dle jeho složitosti. Nejrozšířenější je tvorba modelu ze dřeva či dřevěných polotovarů, dále je možné modely vytvářet z kovových materiálů a v poslední řadě z plastických hmot.

Provedení modelů ze dřeva či dřevěných polotovarů se rozlišuje dle přesnosti a trvanlivosti na 4 základní druhy, od velmi přesných a trvanlivých modelů pro přesné výrobky po hrubé provedení tlustostěnných modelů pro kusovou výrobu.

Celý model je rozčleněn na dílčí elementární části, jejichž technologie výroby se může lišit. Základní materiál se pak spojuje v jednotlivé části dle jeho požadovaného tvaru, viz Obr. 8. Spojování základního materiálu je provedeno lepením, spojováním pery nebo čepy, případně hřeby či vruty.

Základní tvar vyrobený spojením jednotlivých částí je nutné obrobit do podoby výsledného odlitku. Po obrobení je vhodné ručně upravit přechodové části, přetmelit případné vady a opatřit model nátěrem.



Obr. 8 Model vyrobený z desek

Modelová zařízení vyráběná z kovových materiálů se vyrábějí odléváním z hliníkových slitin, je tak dosahováno trvanlivějšího modelového zařízení než v případě modelů ze dřeva. Při vyšších nárocích na životnost modelového zařízení je

využito mosazi, případně dílů tvářených. Následné dokončovací operace jsou prováděny na třískových obráběcích strojích.

Moderní modelářské dílny využívají CNC obráběcích center, případně technologií na zhotovení celého modelu metodou 3D tisku, kde je využito plastických hmot a je možné vyrobit jakýkoli tvar, kterého by se ručním, nebo strojním obráběním, dosahovalo velice těžko. Tyto technologie jsou z ekonomického hlediska velice nákladné, proto se dnes stále setkáváme s ručními modeláři využívajícími dřevěných materiálů.

1.4 Hliníkové slitiny pro slévárenství

[8]

Hliníkové slitiny jsou určeny k výrobě tvarových odlitků litím do pískových či kovových forem gravitačním či tlakovým způsobem. Nedosahují pevnosti tvářených výrobků. V případě lití do písku vzniká hrubá struktura s nižšími pevnostními charakteristikami. Při lití do kovových forem nebo litím tlakovým vzniká struktura jemná s lepšími vlastnostmi.

Slévárenské slitiny lze rozdělit na:

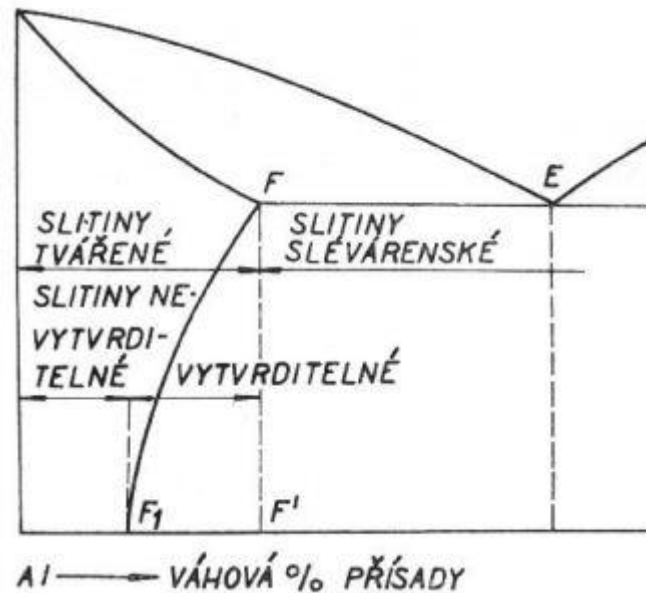
-Binární slitiny – Al-Si, Al-Mg, Al-Cu

-Speciální slitiny – Al-Si-Mg, Al-Si-Cu

Přísady Mg a Cu umožňují vytvrzení těchto slitin.

Pro slévárenství jsou velice výhodné eutektické slitiny Al-Si s obsahem Si kolem 11,7 %. Hrubé a křehké krystaly křemíku mají poměrně nízkou pevnost $R_m=130-140$ Mpa, proto je vhodné krystaly křemíku v eutektiku zjemnit podchlazením taveniny zvýšenou rychlostí ochlazování a tím dosáhnout vyšší rychlosti eutektické přeměny, případně modifikací malým množstvím alkalických kovů, jako je sodík či lithium. Tento způsob je univerzálnější, neboť zrychlení ochlazování lze u pískových forem realizovat velice obtížně v celém průřezu odlitku.

Mechanické vlastnosti hliníkových slitin lze měnit vytvrzováním, ale pouze u slitin, které mají v rovnovážném diagramu dostatečně výraznou změnu rozpustnosti, viz Obr. 9.



Obr. 9 Rovnovázný diagram vytvrditelné slitiny

Tato technologie vyžaduje dosažení homogenního tuhého roztoku, kterého lze dosáhnout rozpouštěcím žíháním. Následně se součást ochladí ve vodě o teplotě 20 °C, u tvarově složitějších součástí ve vodě o teplotě 40-50 °C, díky čemuž získáme přesycený tuhý roztok a zabrání se segregaci fází. Následně součást podstoupí stárnutí, probíhá nukleace nové fáze, jejímž růstem vznikají Gunier-Prestonova pásma, která za zvýšené teploty rostou a způsobují rozpad přesyceného roztoku.

2 Experimentální část

2.1 Materiálová analýza

[11]

Pro zjištění původního použitého materiálu bylo nutné získat vzorek, který by odpovídal dobře i místu vzniku. To bylo možné díky zapůjčení torza disku AT 13 508, viz Obr. 10, který se vyráběl zároveň s dělenými disky, jejichž součástí je právě odlévání límec v bývalé slévárně ČKD Hradec Králové.



Obr. 10 Kolo poškozené při automobilové soutěži

Z disku bylo nutné oddělit vzorek a obrobit jej tak, aby byl zbaven oxidace a vytvořily se rovnoběžné plochy. Na vzniklých plochách je provedena materiálová analýza stolním jiskrovým optickým emisním spektrometrem Q4 Tasman Obr. 11.



Obr. 11 Spektrometr Q4 Tasman

Při procesu materiálové analýzy je vzorek umístěn na stativ přístroje, kde je pneumaticky upnut, a po spuštění plazmového generátoru dojde k vyhodnocení vzorků s údaji o procentuálním zastoupení jednotlivých prvků. Pro zajištění vysoké přesnosti bylo provedeno pět měření, jejichž výsledek je uveden v

Tab. 1. Kvůli malým rozměrům vzorku bylo nutné vzorek po provedení několika měření přebrousit a měřit na nově vzniklé ploše, čímž byl materiál analyzován v různých průřezích, ne pouze v jedné ploše, viz Obr. 12.



Obr. 12 Vzorek po spektrometrickém měření

Tab. 1 Složení vzorku

Mg	Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Sn
%	%	%	%	%	%	%	%
91,47	7,606	0,532	0,312	0,028	0,026	0,0075	0,007

Ca	Ce	Ni	Ag	La	Cd	Be	Sr
%	%	%	%	%	%	%	%
0,006	0,0049	0,0037	0,001	0,001	0,0005	0,0001	0,0001

Hledání shody bylo jednodušší díky povědomí o tom, že soutěžní disky byly vyráběny ze slitiny s obchodním názvem Elektron, tedy slitiny s obsahem nejméně 90% hořčíku a nejvíce 10 % hliníku, která byla vyvinuta počátkem 20 století firmou Griesheim-Elektron. Elektron se vyznačuje velmi dobrými mechanickými vlastnostmi, dobrou obrobiteľností, vysokou tvrdostí a především nízkou hustotou, která se pohybuje okolo hodnoty 1800 kg/m^3 .

Zjištěný obsah látek odpovídá slitině ČSN 42 4911, vyskytující se v nabídce slévárny Explat, spol. s r.o. Hradec Králové (dříve ČKD Hradec Králové). [12] Pro slitinu je použit název AZ91 s obsahem jednotlivých látek dle Tab. 2. Příměsi jako železo, křemík či měď jsou zastoupeny pouze ve stopovém množství, nemají zásadní vliv na vlastnosti slitiny a proto v tabulce nejsou uvedeny.

Tab. 2 Složení slitiny AZ91

Mg	Al	Zn	Mn
%	%	%	%
89,7-92,2	7,5-9	0,2-0,8	0,15-0,5

Slitina AZ91 je velice špatně dostupná. V České republice ji odlévá výhradně Explat, spol. s r.o. Hradec Králové. Dalším negativem slitiny AZ91 je horší odolnost proti korozi, zejména posypová sůl používaná v zimním období korozi urychluje, viz Obr. 13.



Obr. 13 Disk v pokročilém stupni koroze

Pro vlastní odlití límce disku byl zvolen materiál, který je chemicky stálější a oproti AZ91 je nabízen v mnoha českých slévárnách. Jedná se o slitinu hliníku s křemíkem tzv. silumin, která dobře odolává korozi, velice dobře se obrábí a vzhledem k menší tvarové složitosti odlitku se pro tuto aplikaci jeví jako optimální. [13]

Konkrétně byl zvolen materiál AlSi10Mg, který lze díky příměsi hořčíku vytvrzovat. Chemické složení slitiny viz Tab. 3.

Tab. 3 Složení slitiny AlSi10Mg

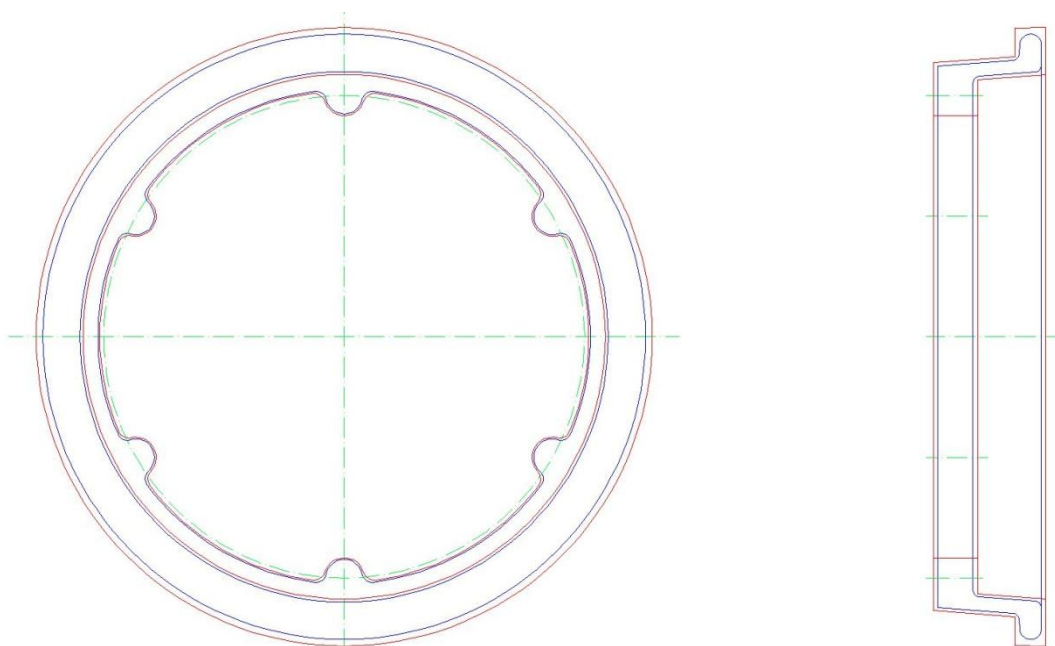
Si %	Mg %	Fe %	Mn %	Ti %	Zn %
9-11	0,2-0,45	max 0,55	max 0,45	max 0,15	max 0,1

2.2 Konstrukce formy

Pro konstrukci formy je nutné provést řadu výpočtů a držet se jednotlivých zásad a předpisů tak, aby byla zajištěna její správná funkce a omezil se možný vznik vad odlitku.

2.2.1 Model

Límeč kola má většinu ploch obráběných. Přídavek na obrábění činil 2 mm materiálu s výjimkou vnitřní plochy u kotevních bodů, které zůstávají v surovém stavu. Zde bylo nutné zohlednit teplotní smrštění a tato místa patřičně zesílit. Přidávky jsou patrné z Obr. 14.



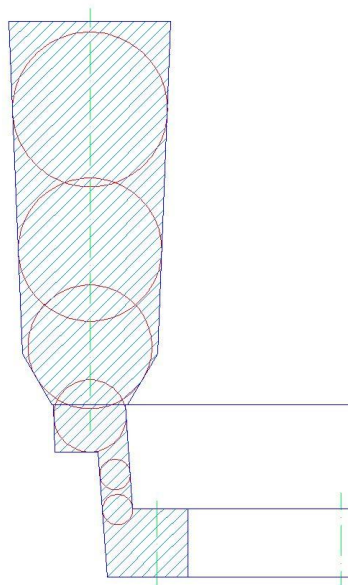
Obr. 14 Průhled odlitku a obrobku

Kotevní body s otvorem pro šroub s vnitřním šestihranem byly zaslepeny a budou zhotoveny třískovým obráběním. Na vnější straně límce je vytvořen úkos zajišťující snadné vyjmutí dřevěného modelu při formování.

2.2.2 Nálitky

[2], [3]

Nálitky jsou otevřené vůči atmosféře a vyúsťují na povrch formy. Jejich výška je dána výškou formovacího rámu a průřez je volen dle metody vepsaných koulí, viz Obr. 15 tak, aby se náletek směrem vzhůru stále rozšiřoval. Počet náleků je stanoven tak, aby jejich rozmístění na dutině formy bylo co nejsymetričtější vůči poloze zářezů s ohledem na správné plnění své funkce zásobníku taveniny.



Obr. 15 Nálitek připojený k dutině formy

Metodou podle Příbyla byla ověřena správnost návrhu náleků dle vzorce 1:

$$V_N = V_o * \left[\frac{x \cdot \beta}{1 - x \cdot \beta} \right] [mm^3] \quad (1)$$

β – smrštění taveniny při změně teplot, od lití po teplotu tuhnutí [-]

V_o – objem odlitku [mm^3]

V_N – součet objemu náleků [mm^3]

x – součinitel nehospodárnosti odlitku [-]

Smrštění taveniny pro odlití hliníku je $\beta=0,05$, koeficient nehospodárnosti pro náletek otevřený do atmosféry je $x=6$. Objem odlitku je získán z modelu v programu ProE Wildfire 4.0 $V_o=1358500 \text{ mm}^3$.

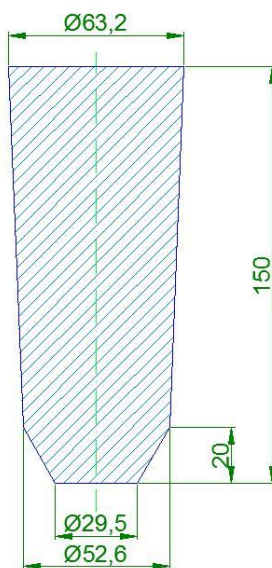
Po dosazení:

$$\Sigma V_N = 1358500 * \left[\frac{9 * 0,05}{1 - 9 * 0,05} \right] = 1111500 [\text{mm}^3] \quad (2)$$

Při rozmístění více náleků na odlitek je objem náleků dělen jejich počtem:

$$V_N = \frac{\Sigma V_N}{3} = 370500 [\text{mm}^3] \quad (3)$$

Náletek je konstruován jako dva komolé kužely nad sebou. Geometrie náletku pak odpovídá výkresu viz Obr. 16.



Obr. 16 Tvar a rozměry náletku

2.2.3 Vtoková soustava:

[2], [3]

Průřezy vtokové soustavy jsou voleny v poměru $S_k : S_s : \Sigma S_z = 1,4 : 1,2 : 1$ tak, aby rychlost slitiny v místě zářezů byla co nejvyšší. Soustava je tedy přetlaková.

Doba lití:

Pro menší odlitky je určena vztahem

$$t_{lití} = a\sqrt{m}[s] \quad (4)$$

a – součinitel závisející na tloušťce stěny odlitku a na druhu materiálu [-]

m – hmotnost odlitku včetně náliťků [kg]

Tloušťce odlitku 9-14 mm pro slitinu hliníku odpovídá hodnota součinitele $a=2,05$. Z objemu $V_o=0,0013585 \text{ m}^3$ a hustoty použité hliníkové slitiny $\rho_o=2650 \text{ kg/m}^3$ lze stanovit hmotnost odlitku $m_o=3,6 \text{ kg}$. Z objemu náliťků $V_N=0,0011115 \text{ m}^3$ a stejné hustoty odlévaného materiálu plyne hmotnost náliťků $m_N=2,95 \text{ kg}$. Hmotnost m je pak součtem těchto dvou hmotností. Nyní lze přistoupit k výpočtu doby lití.

$$t_{lití} = 2,05\sqrt{6,55} = 5,25[s] \quad (5)$$

Stanovení účinné výšky:

Účinná výška pro horní vtok se rovná celkové výšce vtokové soustavy v tomto případě dané výškou slévárenského rámu.

$$H_{\text{ú}} = H = 150[\text{mm}] \quad (6)$$

H – celková výška vtokové soustavy [mm]

Určení součinitele hydraulických ztrát:

Z Tab. 4 byl zvolen součinitel hydraulických ztrát $\mu=33$, který odpovídá složité vtokové soustavě.

Tab. 4 Součinitel hydraulických ztrát μ

materiál odlitku	součinitel hydraulických ztrát μ		
	velký	střední	Malý
slitiny neželezných kovů	0,33	0,38	0,43

Určení sumy průřezu zářezů:

Nyní je nutné stanovit minimální průřez sumy všech zářezů, který vychází ze vzorce:

$$\Sigma S_{min} = \frac{m}{[\mu * \rho_o * \sqrt{2 * g * H_{\dot{u}}} * t_{lití} * 10^{-6}]} [mm^2] \quad (7)$$

m – hmotnost odlitku včetně nálitků [kg]

μ – součinitel hydraulických ztrát [-]

ρ_o – hustota hliníkové slitiny [kg/m³]

g – gravitační konstanta [s⁻¹]

$H_{\dot{u}}$ – účinná výška vtokové soustavy [mm]

$t_{lití}$ – čas lití [s]

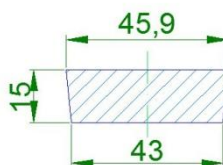
Po dosazení do vzorce za všechny již známé veličiny je minimální průřez stanoven:

$$\Sigma S_{min} = \frac{6,55}{[0,33 * 2650 * \sqrt{2 * 9,81 * 0,150} * 5,25 * 10^{-6}]} = 831 [mm^2] \quad (8)$$

Z důvodu rychlého tuhnutí hliníkových slitin, je dobré volit více zářezů v různých částech formy. Pro tuto aplikaci byly zvoleny dva zářezy o průřezu S_z .

$$S_z = \Sigma S_z / 2 = 415,5 [mm^2] \quad (9)$$

Proto jsou použity dva lichoběžníkové zářezy. Geometrie zářezu poté vypadá dle Obr. 17.



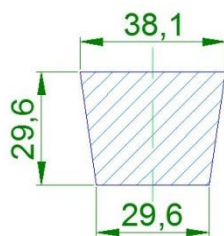
Obr. 17 Tvar a rozměry zářezu

Průřez vodorovného licího kanálu:

Aby docházelo ke zvýšení tlaku v zářezích, musí mít vodorovný licí kanál větší průřez, než je suma průřezu zářezů. Zvolený poměr je 1,2:1.

$$S_s = 1,2 * \sum S_z = 997,2[mm^2] \quad [10]$$

Tvar vodorovného licího kanálu je rovnoramenný lichoběžník, který je orientovaný tak, aby širší stranou přiléhá na zářez. Geometrie vodorovného licího kanálu poté vypadá dle Obr. 18.



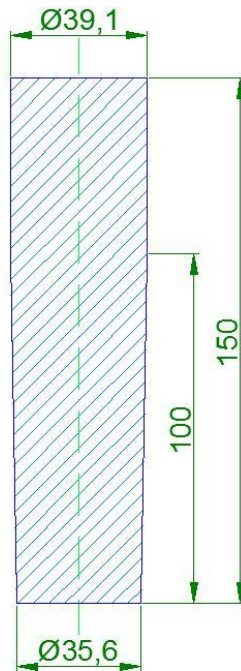
Obr. 18 Tvar a rozměry vodorovného licího kanálu

Svislý licí kanál

Svislý licí kanál je konstruován tak, aby jeho spodní plocha, navazující na vodorovný licí kanál, odpovídala poměru 1,4:1 vůči součtu ploch zářezů.

$$S_K = 1,4 * \sum S_z = 997,2[mm^2] \quad [11]$$

Svislý licí kanál je komolý kužel, jehož geometrie je patrná z Obr. 19.



Obr. 19 Tvar a rozměry svislého lícího kanálu

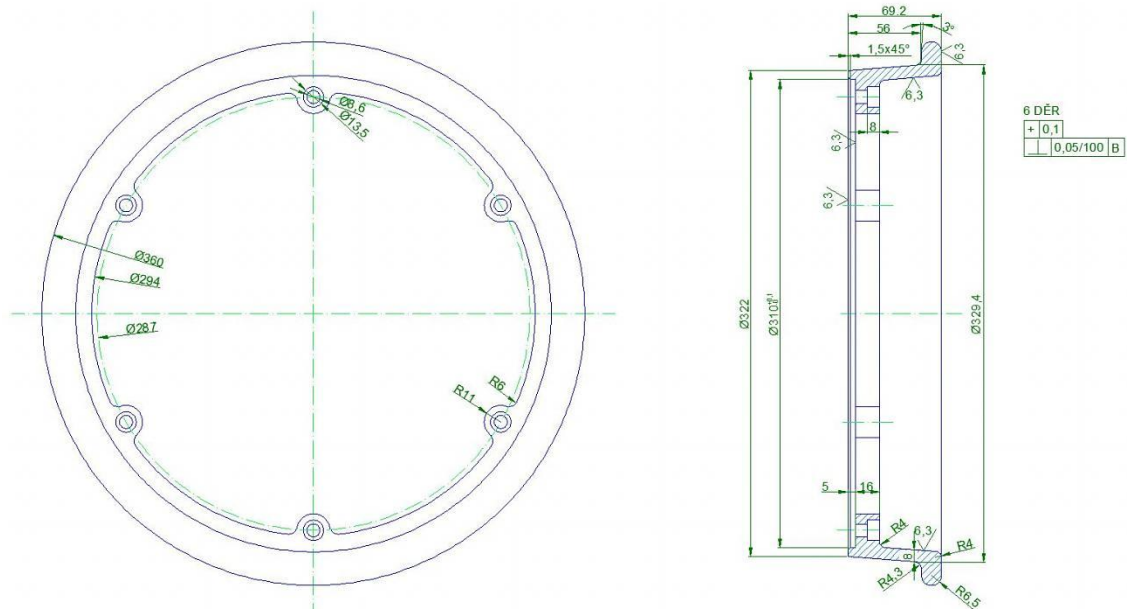
Tímto je návrh geometrie celého modelového zařízení dokončen. Dle těchto poznatků je možné přistoupit k výrobě a odlít zkušební sérii, kterou se ověří správnost výpočtů. Další možností je simulace lícího procesu, která by umožnila vyhnout se případné výrobě zmetků.

2.3 Simulace lícího procesu

Softwarová simulace odlití umožňuje optimalizaci navržené formy ještě před zavedením do výroby. Správné odlití ovlivňuje mnoho parametrů jako je geometrie formy, odlévaný materiál, jeho teplota či teplota formy. Všechny tyto parametry a mnoho dalších lze v softwaru Magma 5.2 modifikovat, a tak docílit optimálních výsledků. Většinu běžně používaných materiálů odlitku, formovacích směsí, jádrových směsí či filtrů lze nalézt v předdefinovaných databázích.

2.3.1 Příprava podkladů

Pro simulaci liciho procesu bylo nutné připravit řadu podkladů a dokumentace. Dle výkresové dokumentace pro obrobení límce kola zapůjčené ze soukromých zdrojů bylo možné určit důležité rozměry kotevních prvků límce kola, viz Obr. 20.

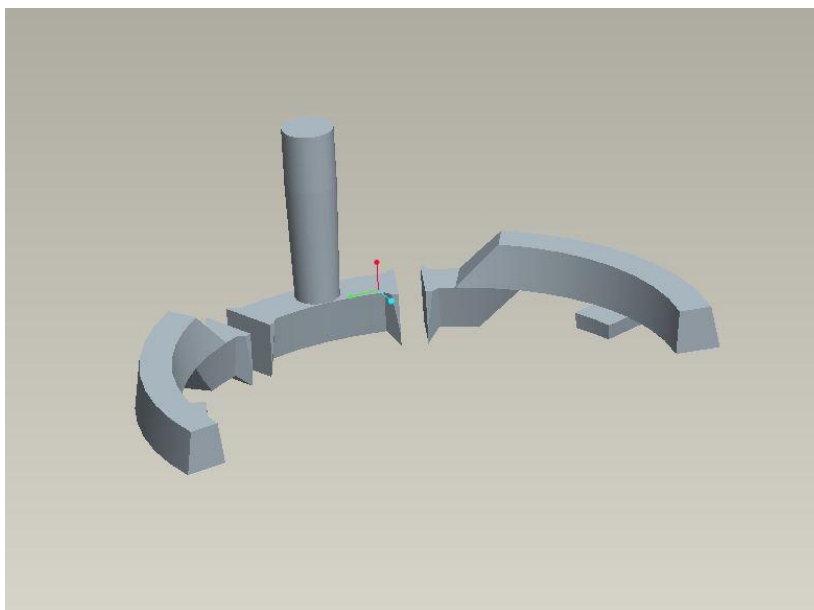


Obr. 20 Výkres pro obrábění původního límce

Následně bylo možné vytvořit dokumentaci pro model límce s technologickými přídávky a přídávky pro obrábění. Po zkonstruování modelu bylo možné vytvořit vtokovou soustavu. Základní poloha límce byla zvolena kotevními body dolů a čelem k dělicí rovině. Tato poloha byla určena s ohledem na co nejjednodušší zaformování.

Vtoková soustava byla zkonstruována dle Obr. 21 tak, aby plnění formy bylo symetrické se zářezy umístěnými na protilehlých stranách dutiny formy. Filtry o rozměru 50x50x22 mm jsou umístěny na obě větve vodorovného liciho kanálu tak, aby byly co nejblíže svislému licímu kanálu, a průřez vodorovného liciho kanálu je v jejich blízkosti zvětšen, aby jejich plocha byla využita co nejefektivněji a nebyla příliš snížena rychlost proudění taveniny.

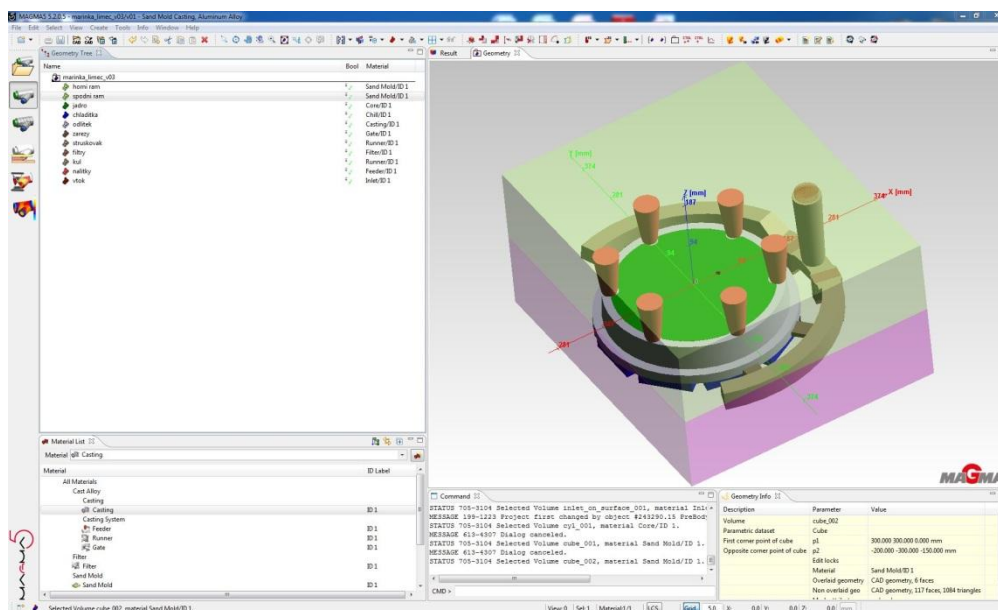
Výkresovou dokumentaci tvořenou v programu AutoCad 2010 bylo nutné převést do 3D podoby v programu ProE Wildfire 4.0, kde se celek opět rozdělit na jednotlivé díly vtokové soustavy, nálitky a model.



Obr. 21 Vřetová soustava s vyjmutými filtry

2.3.2 Simulace odlití

Do programu Magma 5.2 byly jednotlivé části importovány ve formátu .stl a spojeny v celek. Spojitost částí musela být zohledněna už při 3D modelaci kvůli značné degradaci modelu při převodu do formátu .stl. Jednotlivým částem bylo nutné nadefinovat jejich funkci, viz Obr. 22. Celý import předem připravených dat probíhá velice rychle za předpokladu dodržení několik zásad, jako je respektování orientace souřadného systému a postupné vkládání částí s ohledem na jejich návaznost.



Obr. 22 Modelovací prostředí s importovanými daty

Následně bylo nutné vytvořit výpočtovou síť viz Obr. 23, dle které proběhne simulace licího procesu. Ideální hustota sítě je kompromis, na jehož výstupu budou dostatečně detailní výsledky, jejichž výpočet nezabere příliš mnoho času. Proto je dobré nadefinovat částem s nižší prioritou síť hrubší, zatímco problematickým částem nastavit síťování hustší.



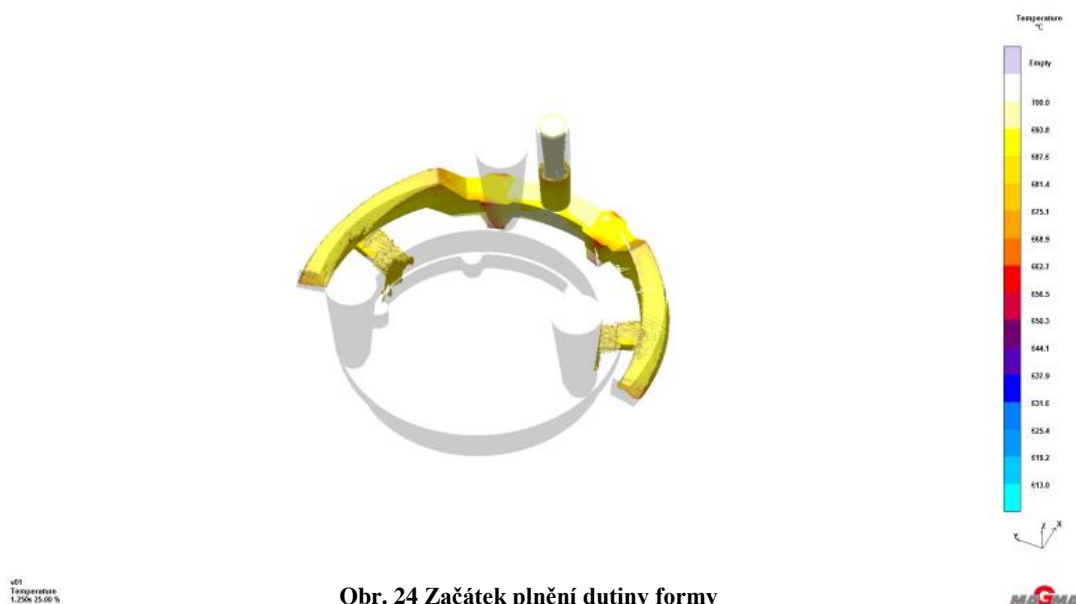
Obr. 23 Model s vytvořenou sítí

Posledním krokem je nastavení parametrů jednotlivých částí. Materiály lze vybrat z databáze, čas plnění a teploty lze nastavit dle skutečných podmínek. V tomto kroku je také nutné nadefinovat prvky simulace, které se mají vyhodnotit a jsou nutné pro optimalizaci licího procesu.

2.3.3 Vyhodnocení simulace

Plnění:

Celý proces plnění trval 5,25 sekundy. Během první sekundy se zalil vodorovný licí kanál až k zářezům roztaveným kovem bez výrazného ochlazení. Proud taveniny se poté symetricky rozdělil na část, která pokračovala dál vodorovným licím kanálem, a část která začala zářezy plnit formu. V čase 1,5 sekundy se tavenina ve vodorovném licím kanálu odrazila od jeho konce a začala se pozvolna vracet, čímž se zabránilo prudkému výstřiku taveniny do dutiny formy a omezilo se tak případné vymílání pískové formy, viz Obr. 24.



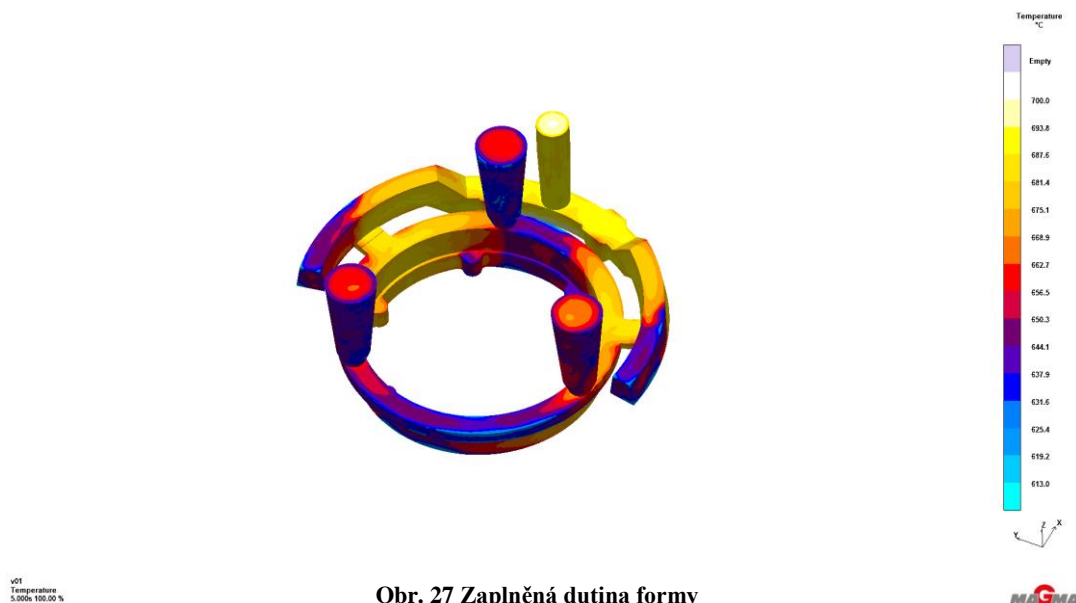
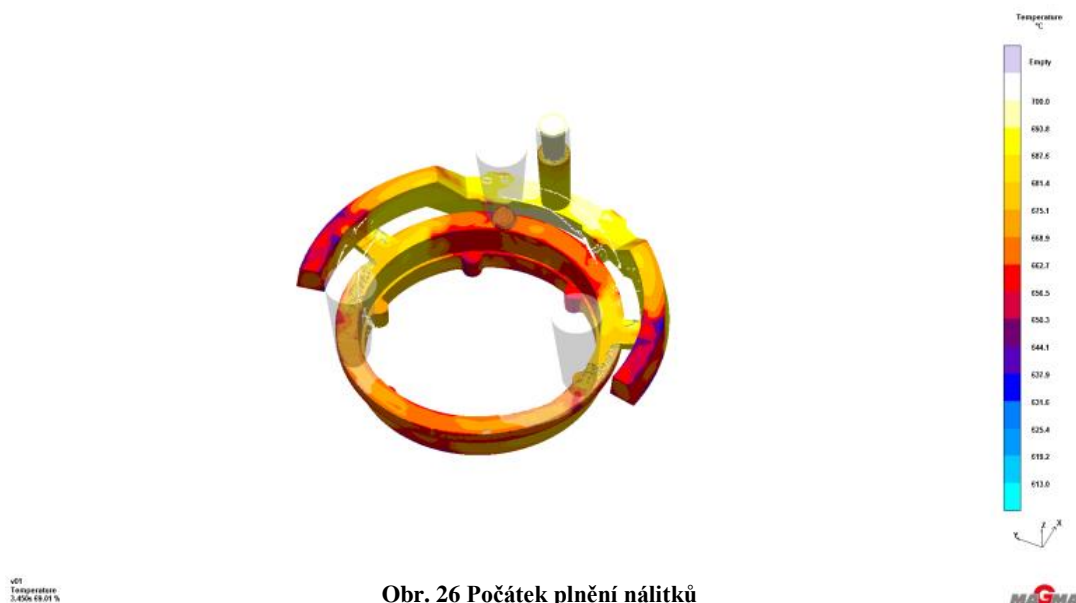
Obr. 24 Začátek plnění dutiny formy

Při dosažení času 2 sekund je již celý vodorovný lící kanál zaplněn a veškerá tavenina směřuje do dutiny formy, která se zářezy plní zcela symetricky. Nejdříve se zalévá spodní část, doplňují se kotevní místa límce a postupně dochází ke spojení obou proudů taveniny. V čase 2,5 sekundy se hladina začíná zvedat, viz Obr. 25.



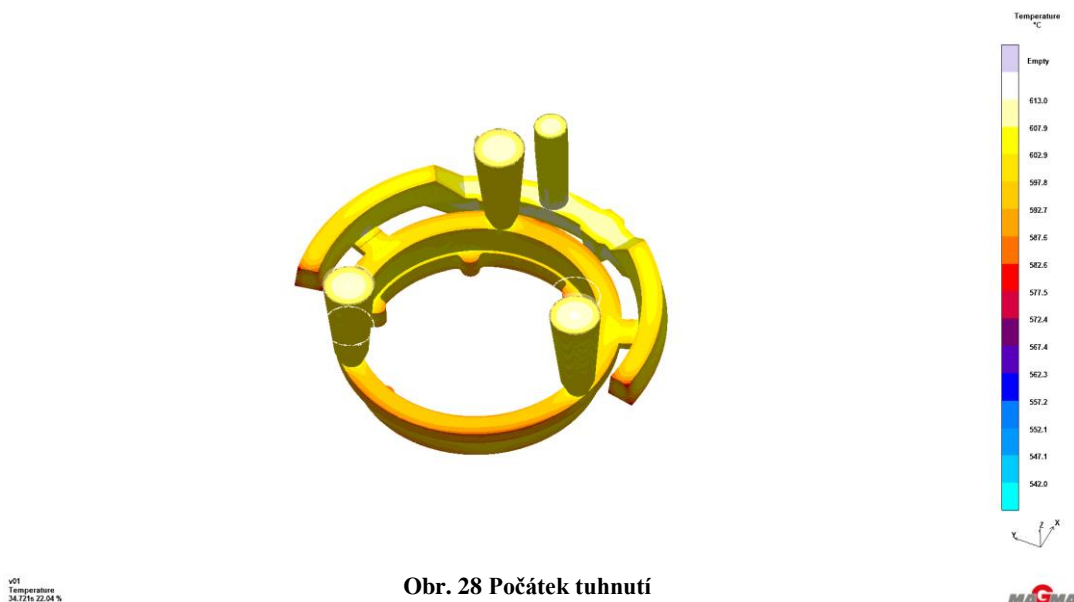
Obr. 25 Zaplnění spodní části dutiny formy

Poté se forma plynule plní až do času 3,5 sekundy, kdy tavenina dosáhne její horní hrany, a začínají se plnit nálitky, viz Obr. 26. Tavenina ve formě na odvrácené straně od nálitků přestává proudit a začíná chladnout. Při dosažení plné výšky nálitků v čase 5,25 sekund je forma zaplněna a proces plnění je u konce viz, Obr. 27.

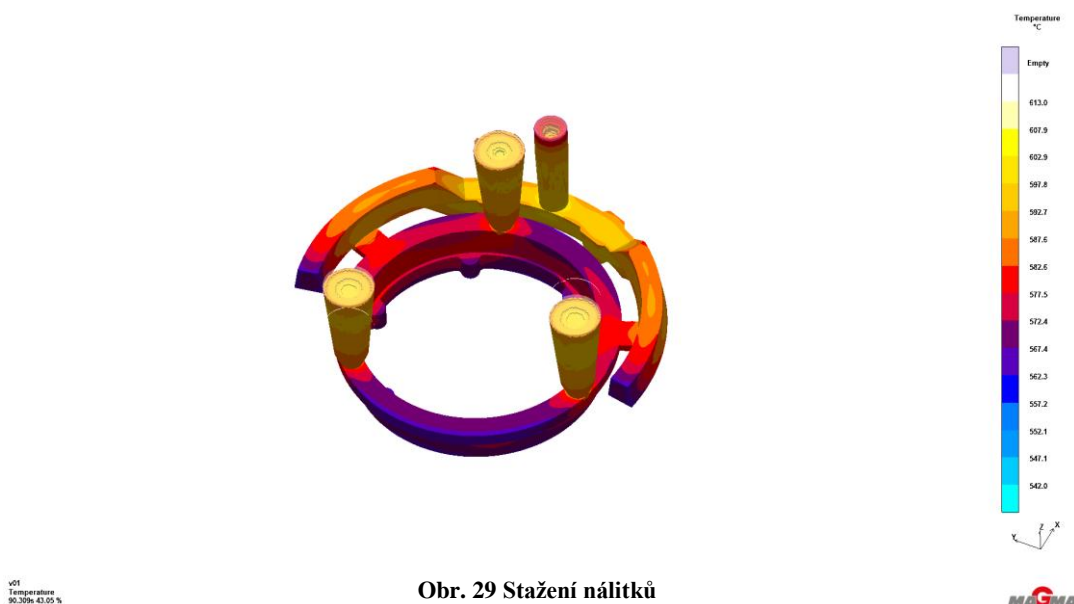


Tuhnutí:

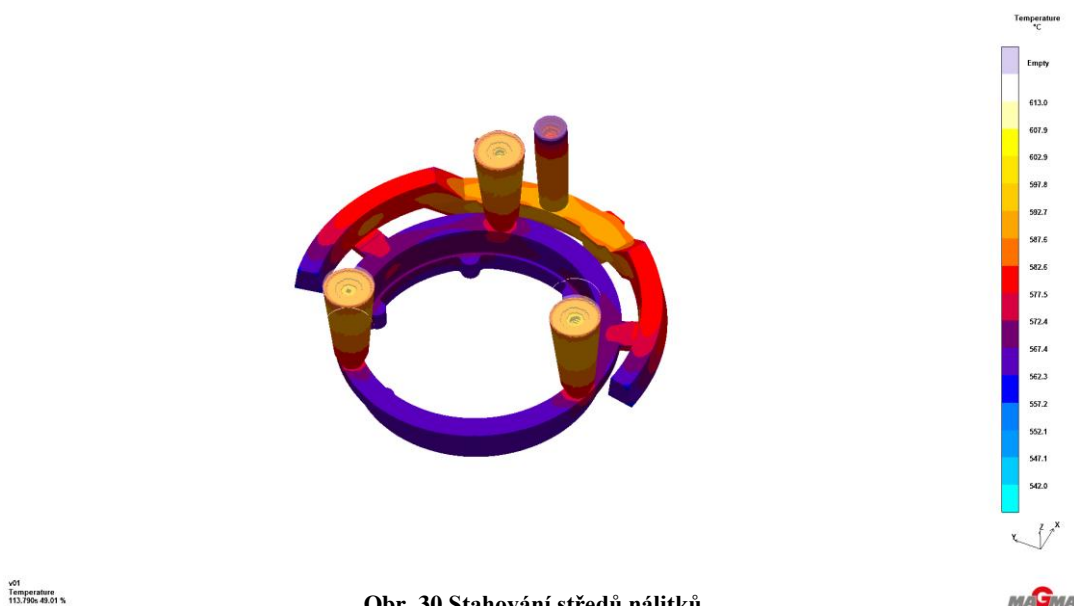
Celý proces chlazení v pískové formě trvá 574s, tedy zhruba 9,5minuty. Forma začíná chladnout od míst, kde tavenina přestala proudit nejdříve. Odlitek chladne v celém svém průřezu stejně, poslední se ochlazují nálitky a zářezy, viz Obr. 28.



V čase 17 sekund lze pozorovat mírný pokles hladiny v nálitcích, čímž je ověřena jejich správná funkce tkvící v doplňování taveniny zpět do formy. Jejich teplota je stále nejvyšší. Tento jev lze pozorovat na Obr. 29.



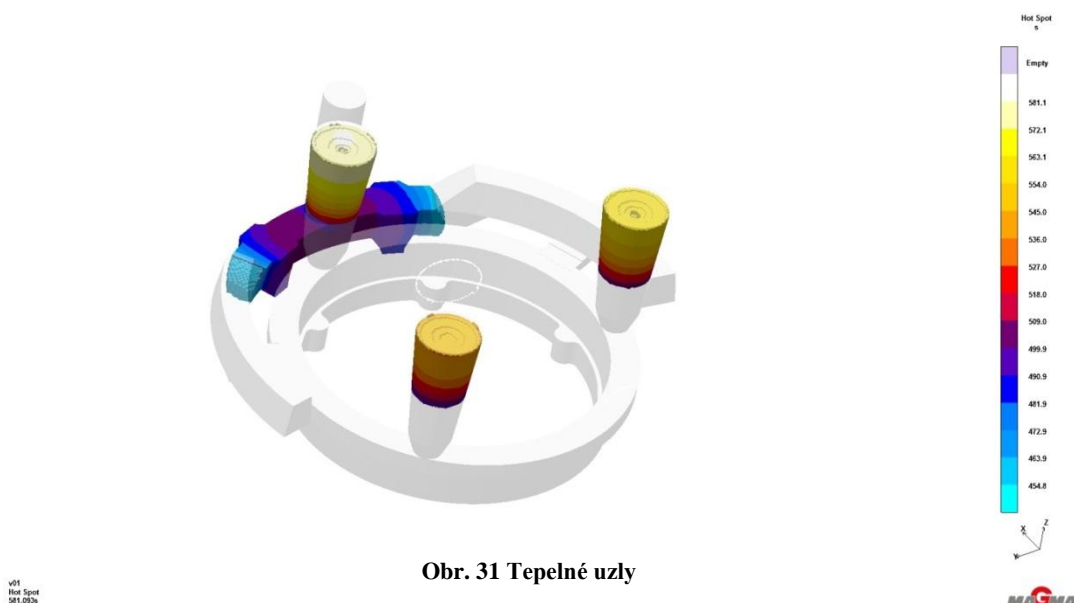
Při pozvolném ochlazení stěn nálitku se tavenina začíná stahovat ze středu nálitku, úbytek v celé ploše hladiny již není patrný, viz Obr. 30. Teplota v nálitcích zůstává nejvyšší po celou dobu chladnutí odlitku.



Obr. 30 Stahování středů nálitků

Tepelné uzly:

Tepelné uzly přímo vyhodnocuje program Magma 5.2 ve volbě Hot Spots. Pokud se nacházejí mimo odlitek, lze očekávat odlitek bez staženin viz Obr. 31.



Obr. 31 Tepelné uzly

Porozita:

Dalším důležitým kritériem, které program Magma 5.2 vyhodnocuje, je vznik porozity v odlitku. Porozitu lze pozorovat díky funkci X-Ray, která umožňuje pohled do nitra odlitku skrz formu. Modré plochy znázorňují místa možného vzniku pórů. Uvnitř odlitku se porozita nachází především v místě zářezů, viz Obr. 32.



Obr. 32 Místa vzniku porozity

2.3.4 Alternativní varianta odlitku

[2], [3]

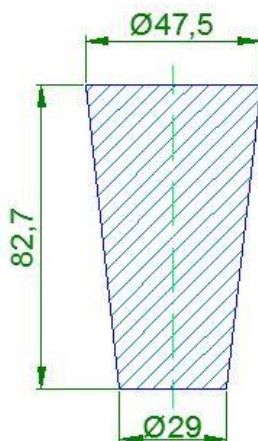
Na základě konzultace ve společnosti Unitherm, s.r.o. Jablonec nad Nisou byla navržena druhá varianta konstrukce vtokové soustavy, počtu náliťků a polohy odlitku. Odlitek je napolohován kotevními body vzhůru, na každý z nich je umístěn náliťek. Vtoková soustava je opatřena čtyřmi zářezy v dolní části odlitku. Na základě těchto změn bylo nutné znovu navrhnout geometrii jednotlivých částí. Pro řízené ochlazování odlitku jsou ve spodní části po obvodu límce umístěna ocelová chladítka.

Nálitky:

Konstrukce s použitím šesti náliťků vyžaduje přepočítání rozměrů náliťků. Celkový objem náliťků $\sum V_n$ je stejný jako v předchozí variantě, dílčí část pro každý náliťek je nutné přepočítat:

$$V_N = \frac{\sum V_N}{6} = 97036 [mm^3] \quad (12)$$

Vzhledem k volbě jiné polohy odlitku se liší výška nálitku. Zjednodušený tvar nálitků odpovídá Obr. 33.



Obr. 33 Rozměry a tvar nálitků

Vtoková soustava:

Vtoková soustava je zachována jako přetlaková a její poměry se neliší od původního návrhu $S_k : S_s : \sum S_z = 1,4 : 1,2 : 1$. Protože se celkové objemy neliší, je zachována i doba odlití $t_{lit}=5,25s$

Stanovení účinné výšky vtokové soustavy:

Umístění zářezů se od původního návrhu liší. Při použití spodního vtoku je nutné znovu určit účinnou výšku, která má značný vliv na průřez zářezů potažmo celé vtokové soustavy:

$$H_{\dot{u}} = H - \frac{C}{2} = 150 - \frac{67,2}{2} = 116,4[mm] \quad (13)$$

H – celková výška vtokové soustavy [mm]

C – celková výška odlitku [mm]

Určení součtu průřezů zářezů:

Pro určení minimálního součtu průřezů je použit stejný vzorec jako v předchozí variantě v rovnici (7) s rozdílem účinné výšky:

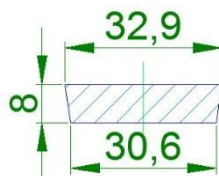
$$\sum S_{min} = \frac{6,55}{[0,33 * 2650 * \sqrt{2 * 9,81 * 0,1164} * 5,25 * 10^{-6}]} = 944[m^2] \quad (14)$$

Z důvodu menší účinné výšky vtokové soustavy, je nutné plnit formu zářezy o větším průřezu než v předchozí variantě.

Pro tuto variantu jsou zvoleny čtyři zářezy, proto je nutné součet průřezů zářezů dělit jejich počtem:

$$S_z = \Sigma S_z / 4 = 236 [mm^2] \quad (15)$$

Rozměry zářezů odpovídají Obr. 34.



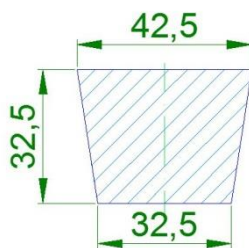
Obr. 34 Rozměry a tvar zářezů

Průřez vodorovného liciho kanálu:

Zvětšení zářezů se projeví i na vodorovném licím kanálu:

$$S_s = 1,2 * \Sigma S_z = 1219,2 [mm^2] \quad (16)$$

Tento průřez odpovídá rozměrům viz Obr. 35.



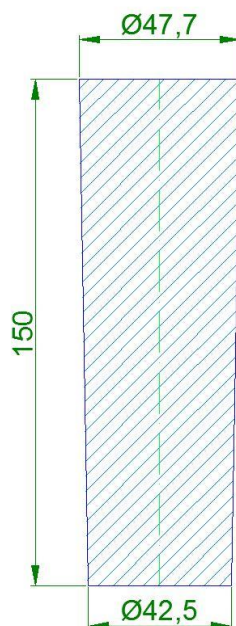
Obr. 35 Rozměry a tvar vodorovného liciho kanálu

Svislý lici kanál:

Poměrné zvětšení svislého liciho kanálu je:

$$S_K = 1,4 * \Sigma S_z = 1422 [mm^2] \quad (17)$$

Tvar svislého licího kanálu je změněn na komolý kužel viz Obr. 36.



Obr. 36 Rozměry a tvar svislého licího kanálu

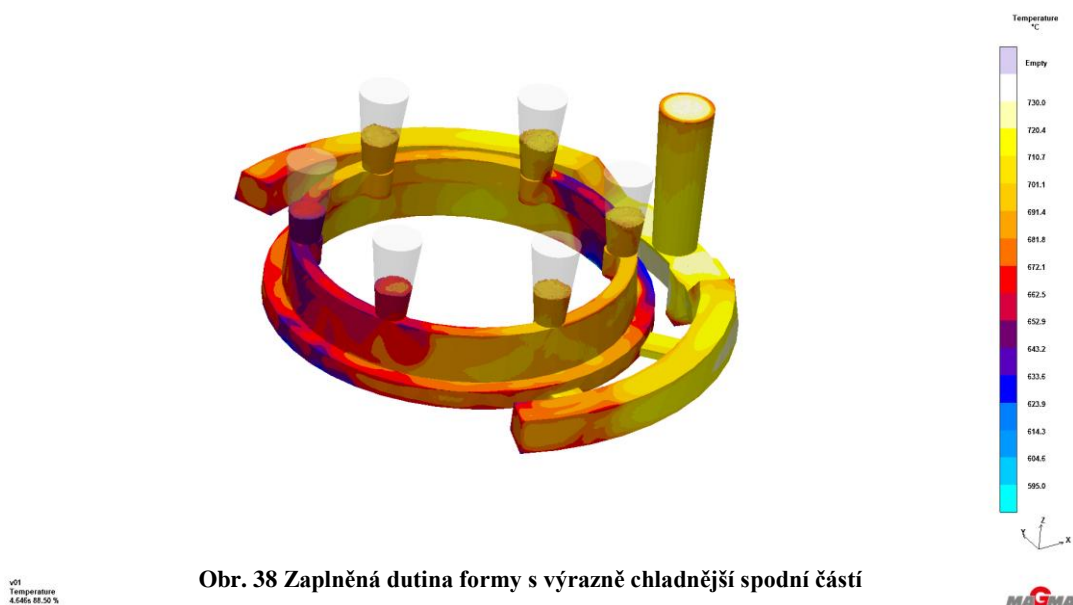
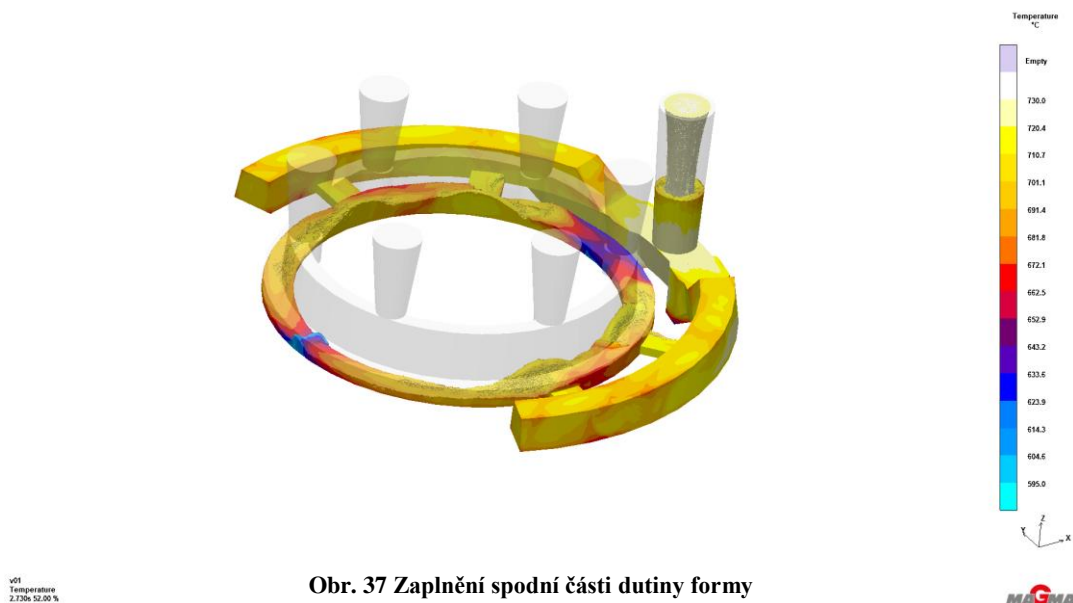
2.3.5 Simulace odlití alternativní varianty odlitku

Postup pro tvorbu dat byl obdobný jako v případě první varianty. Nejprve byla namodelována celá forma v programu ProE Wildfire 4.0, po provedení importu dat do programu Magma 5.2 v tomto v případě ve formátu .sat, díky čemuž nebyla importovaná data podrobena kompresi a celek byl po vložení spojitý. Následně byly stejně definovány parametry simulace.

Doba lití a materiál se shodovaly s první variantou. Významnou změnou bylo doplnění formy o ocelová chladítka a nepravé jádro z CT směsi. Byly požadovány stejné prvky k vyhodnocení a simulované odlití proběhlo za stejných podmínek jako první varianta tak, aby výsledky byly porovnatelné.

Plnění:

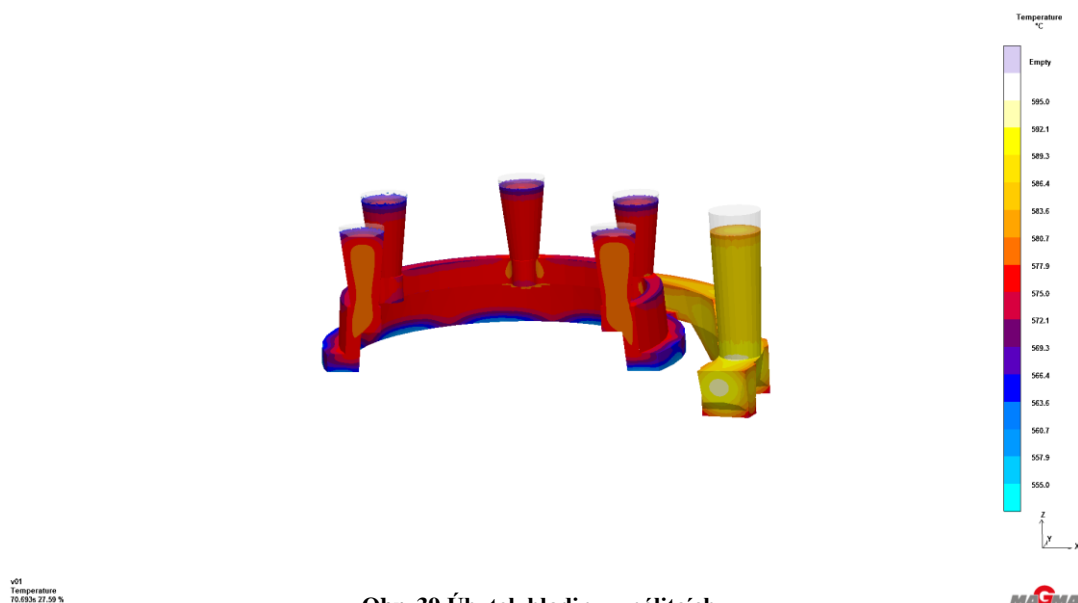
Průběh plnění formy se nijak zásadně nelišil od předchozí varianty. Nejprve se proud taveniny symetricky rozdělil ve vodorovném licím kanálu. Tavenina se začala zářezy plynule vlévat do dutiny formy, v ní se proudy opět spojily a forma se začala doplňovat do výšky, viz Obr. 37. Jedinou změnou, kterou šlo s určitostí pozorovat, bylo ochlazení taveniny v dolní části formy způsobené chladítky, která odváděla teplo, viz Obr. 38.



Tuhnutí:

[13]

Proces tuhnutí probíhal postupným ochlazováním od spodní hrany, kde byl odvod tepla nejintenzivnějším díky vloženým chladítkům. Snižování hladiny v nálitcích bylo zřetelnější kvůli jejich menšímu průřezu, viz Obr. 39. Smrštění objemu v nálitcích odpovídá cca 15 % jejich objemu.



Obr. 39 Úbytek hladiny v nálitcích

Porozita:

V hodnocení porozity je evidentní přínos ve změně technologie. Úpravou polohy zářezů a zvětšením jejich počtu bylo docíleno úplného odstranění porozity tvořené v blízkosti nálitků. Možný výskyt porozity v dutině formy je procentuálně vyčíslen na 0,1% a odlitek je tak hodnocen jako zdravý viz Obr. 40.



Obr. 40 Výskyt porozity v odlitku

2.3.6 Vyhodnocení simulací

Obě varianty by dle simulací ve výrobě obstály a na konci výrobního řetězce by představovaly kvalitní odlitky, přesto je evidentní přínos konzultace ve společnosti Unitherm s. r. o. Jablonec nad Nisou. Díky jejich zkušenostem je technologie výroby optimální, proto při výrobě byla zvolena druhá varianta i přes větší náročnost při formování.

2.3.7 Výroba modelu

Výroba modelu proběhla zakázkou v dřevomodelářské dílně, kde z dřevěných skruží bylo slepeno několik prstenců, které se následně vrstvily na sebe. Po dosažení požadované výšky bylo možné výsledný prstenec upnout do soustruhu a obrobit jej tak, aby vznikla rotační část límce. Poté bylo nutné vyrobit kotevní části límce, které se k prstenci připevnili pomocí hřebů. Vzniklou hranu bylo nutné ručně přetmelit a vybrousit. Poté byl model opatřen nátěrem, čímž získal hladký a celistvý povrch, viz Obr. 41.



Obr. 41 Zhotovený model límce

2.3.8 Odlití límce

Odlití proběhlo ve společnosti Unitherm, s. r. o. Jablonec nad Nisou, dle dodaných podkladů ověřených simulací. Celá příprava pískové formy a odlití samotné

včetně ochlazení na teplotu, kdy bylo možné odlitek vyjmout z pískové formy, trvalo přibližně 1,5h.

Nejprve bylo vytvořeno nepravé jádro zasypáním vnitřku modelu CT směsí a jejím vytvrzením pomocí oxidu uhličitého, viz Obr. 42.



Obr. 42 Model s jádrem z CT směsi po vytvrzení

Dále byl model s jádrem umístěn do vrchního slévárenského rámu a byl opatřen vtokovou soustavou viz Obr. 43.



Obr. 43 Model osazený částí vtokové soustavy

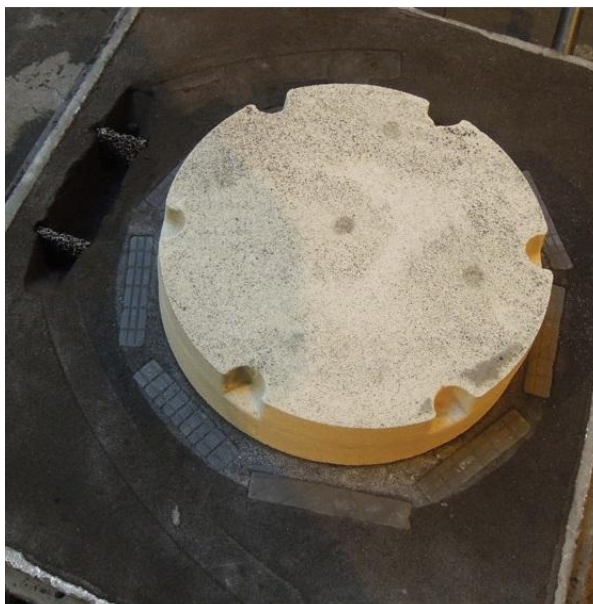
Model s jádrem a vtokovou soustavou byl zasypán modelovou směsí získanou prosetím bentonitové směsi. Na model byly umístěny nálitky a svislý lící kanál. Zbýlý prostor v rámu byl vyplněn směsí méně kvalitní, která se při vrstvení několikrát přechovala, viz Obr. 44.



Obr. 44 Upěchovaná formovací směs

Po zaplnění slévárenského rámu se zarovnal horní hrana a celý rám se otočil, opatřil se poslední částí vtokové soustavy s prostorem pro filtry a obvod límce byl osazen chladítky. Nakonec se zaplnil i spodní rám formovací směsí a řádně se upěchoval.

Při poslední manipulaci se slévárenskými rámy byl vyjmut model a osazen filtry, viz Obr. 45, následně se rámy sesadily v poloze, ve které byl límec odlit.



Obr. 45 Druhá část formy s jádrem a chladítky

Když materiál dosáhl lící teploty 730°C , bylo možné začít plnit formu, viz Obr. 46. Po doplnění formy bylo do každého nálitku dolito malé množství taveniny kvůli udržení nejvyšší teploty v nálitcích a zabránění vzniku staženiny, přestože dle simulace tento krok nebyl nutný.



Obr. 46 Plnění formy taveninou

Po zchladnutí se odlitek vyjmul z formy, viz Obr. 47. Nepravé jádro bylo nutné rozbít za pomoci pneumatického kladiva.



Obr. 47 Hrubý odlitek vyjmutý z pískové formy

Po zchladnutí bylo možné oddělit nálitky a vtokovou soustavu. Následně byl límec umístěn do pece, kde proběhlo vytvrzování. Konečný vzhled odlitku je patrný z Obr. 48.



Obr. 48 Vytvrzený odlitek

3 Závěr

Tato práce je zaměřena na možnost malosériové výroby límců kol, které se zásadně neliší od jakékoli výroby obdobných odlitků, případně lze tento postup aplikovat na různé modifikace těchto límců dle soutěže, dle rozměru použitých pneumatik či úpravě pro jiný typ středu disku.

Při řešení této práce bylo zjištěno několik dílčích závěrů:

Ekonomická stránka byla jedním ze zásadních prvků, dle nichž byly zvoleny použité technologie. V první řadě bylo nutné dobře zvážit počet vyrobených kusů. Při malém počtu bylo z ekonomického hlediska výhodnější použít pískovou formu, a tak byla učiněna jen malá investice do modelu límce kola. Kdyby se jednalo o větší množství odlitků, bylo by vhodné odlévání do kokily, která by zajistila vyšší míru využití odlévaného materiálu, eliminovala by vliv lidského faktoru, který se může projevit ve špatném zaformování, a jistý by byl i menší podíl vynaložených prostředků na dokončovacích operacích. V rámci této práce ovšem počet vyrobených kusů zdaleka nepřesáhl hranici, kdy by bylo vhodné uvažovat o jiné výrobní technologii.

Výroba modelu byla jednou z hlavních investic. Přestože se nabízí mnoho způsobů výroby modelových zařízení, je klasická podoba výroby ze dřeva v truhlářské dílně stále hojně zastoupena a modelová zařízení se i dnes běžně vyrábějí ručně. Pro tuto aplikaci by byly všechny ostatní varianty velice nákladné. Například 3D tisk s použitím nejlevnějšího materiálu a výrobě samotné skořepiny v nákladech znamená zhruba 20 000 Kč pouze za materiál. V případě ruční výroby dřevěného modelu cena odpovídá desetině této částky.

Technologie gravitačního lití se v tomto případě jeví jako dostatečná vzhledem k silným stěnám odlitku, kde případná vada nepovede k destrukci límce. V nejslabším místě má límec po obrobení tloušťku 8 mm. V porovnání s moderními litými koly, kde se tloušťka límců pohybuje v rozmezí 2-8 mm, by se o správně zvolenou technologii nejednalo a realizovat takto tenkostěnné odlitky by bylo velice obtížné. Pro tyto odlitky by se volila technologie nízkotlakého lití.

Hmotnost výsledného výrobku byla také důležitým parametrem, který rozhodoval o zvoleném materiálu, neboť je konečný výrobek součástí automobilového kola, působí na něj dynamické síly a je považován za tzv. neodpruženou hmotu.

V původní variantě z materiálu AZ91 je hmotnost límce 1,5kg při šířce 2". Hmotnost stejného límce odlitého ze slitiny AlSi10Mg je o 0,7kg vyšší. Vyšší hmotnost se negativně projeví na jízdních vlastnostech, a proto by záměna materiálu u odlitků větších rozměrů, jako je celý disk nebo širší límec, nebyla vhodná. Nepatrné zvýšení hmotnosti nebude na jízdních vlastnostech pozorovatelné. Při odlévání celého disku by byla vhodná úprava některých rozměrů zajišťující nižší hmotnost za podmínky následného podrobení disku simulaci dynamického zatížení.

Softwarová optimalizace probíhala na moderní pracovní stanici značky Dell Workstation s plným vytížením čtyř jader procesoru, i tak celý výpočet simulace trval více než 40 hodin na jednu variantu. Nižší výpočetní výkon by výrazně zpomalil tempo prací.

V rámci bakalářské práce navržena výrobní technologie límce kola za použití gravitačního odlévání do pískové formy, byla zvolena náhradní hliníková slitina místo původní. Celý návrh byl podroben simulaci a optimalizován tak, aby byl výsledný výrobek odpovídající kvality. Nad rámec bakalářské práce byla odlita ověřovací série dvou kusů, které potvrdily správnost výpočtů a návrhu celé soustavy.

4 Zdroje

Použitá literatura

- [1] ČERVENÝ M., ŘEPA K.: Škoda 130 RS Vítěz mistrovství Evropy značek 1981, Praha 2003
- [2] NOVÁ I.: Teorie slévání 1.díl, Vyd. 1. FS-KSP, TU v Liberci 2006.
- [3] SLOVÁK S., RUSÍN K.: Teorie slévání, Vyd. 1. SNTL, Praha 1990.
- [4] VETIŠKA A. a kol.: Teoretické základy slévárenské technologie, Vyd. 1, Praha 1974
- [5] PETRŽELA L.: Slévárenské formovací látky, Praha 1955
- [6] RUSÍN K.: Disperzní formovací materiály. [Skripta] VUT Brno 1972
- [7] JELÍNEK P.: Pojivové soustavy slévárenských formovacích směsí (Chemie slévárenských pojiv), Vyd. 1, Ostrava 2004
- [8] PTÁČEK, L.: Nauka o materiálu II, Vyd. 1, CERM 2002
- [9] Časopis Slévárenství 11-12/2007
- [10] HERMAN A.: Nástroje pro výrobu odlitků - modelová zařízení - materiály, výroba, [online], Praha 2009, dostupné z: http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/NVPO/modelova_zarizeni_1.pdf
- [11] NĚMEC B.: Ottův slovník naučný nové doby, Praha 2003
- [12] European steel and alloy grades [online], dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_alloy_composition_eu.php?name_id=1227
- [13] KOTAS P.: Integrated Modeling of Process, Structures and performance in Část Parts, Denmark 2011

Seznam obrázků

Obr. 1 John Haugland se Škodou 130RS na Rally Akropolis	12
Obr. 2 3D model dvoudílného disku	13
Obr. 3 Základní části slévárenské formy	14
Obr. 4 Vliv ostřiva na mechanické vlastnosti	17
Obr. 5 Rozdělení pískových zrn.....	17
Obr. 6 Rozdělení generací pojiv	18
Obr. 7 Schéma regenerace ostřiva.....	19
Obr. 8 Model vyrobený z desek	20
Obr. 9 Rovnovážný diagram vytvrditelné slitiny	22
Obr. 10 Kolo poškozené při automobilové soutěži.....	23
Obr. 11 Spektrometr Q4 Tasman	23
Obr. 12 Vzorek po spektrometrickém měření.....	24
Obr. 13 Disk v pokročilém stupni koroze	Chyba! Záložka není definována.
Obr. 14 Průhled odlitku a obrobku.....	26
Obr. 15 Nálitek připojený k dutině formy.....	27
Obr. 16 Tvar a rozměry nálitku.....	28
Obr. 17 Tvar a rozměry zářezu	30
Obr. 18 Tvar a rozměry vodorovného licího kanálu	31
Obr. 19 Tvar a rozměry svislého licího kanálu	32
Obr. 20 Výkres pro obrábění původního límce.....	33
Obr. 21 Vtoková soustava s vyjmutými filtry	34
Obr. 22 Modelovací prostředí s importovanými daty	34
Obr. 23 Model s vytvořenou sítí	35
Obr. 24 Začátek plnění dutiny formy.....	36

Obr. 25 Zaplnění spodní části dutiny formy	36
Obr. 26 Počátek plnění nálitků.....	37
Obr. 27 Zaplněná dutina formy	37
Obr. 28 Počátek tuhnutí	38
Obr. 29 Stažení nálitků.....	38
Obr. 30 Stahování středů nálitků.....	39
Obr. 31 Tepelné uzly.....	39
Obr. 32 Místa vzniku porozity	40
Obr. 33 Rozměry a tvar nálitků.....	41
Obr. 34 Rozměry a tvar zářezů	42
Obr. 35 Rozměry a tvar vodorovného licího kanálu	42
Obr. 36 Rozměry a tvar svislého licího kanálu	43
Obr. 37 Zaplnění spodní části dutiny formy	44
Obr. 38 Zaplněná dutina formy s výrazně chladnější spodní částí	44
Obr. 39 Úbytek hladiny v nálitcích	45
Obr. 40 Výskyt porozity v odlitku	45
Obr. 41 Zhotovený model límce	46
Obr. 42 Model s jádrem z CT směsi po vytvrzení	47
Obr. 43 Model osazený částí vtokové soustavy	47
Obr. 44 Upěchovaná formovací směs	48
Obr. 45 Druhá část formy s jádrem a chladítky	49
Obr. 46 Plnění formy taveninou.....	49
Obr. 47 Hrubý odlitek vyjmutý z pískové formy	50
Obr. 48 Vytvrzený odlitek	50

Seznam tabulek

Tab. 1. Složení vzorku.....	24
Tab. 2. Složení slitiny AZ91.....	25
Tab. 3. Složení slitiny AlSi10Mg.....	26
Tab. 4. Součinitel hydraulických ztrát μ	29

Elektronická příloha

Soubor BakalarskaPrace.pdf s textem bakalářské práce ve formátu .pdf.

Složka s 3D modely ve formátu .prt.

Složka s výkresovou dokumentací ve formátu .dwg.

Složka s výsledky simulace.

Složka s použitými obrázky.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci, nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce.

Datum: 3. 1. 2014

Podpis:

Declaration

I have been notified of fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a license for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 3. 1. 2014

Signature: